

電気通信大学学報 32 巻 2 号 (理工学編) pp. 295-302 February, 1982

# 木星デカメートル波放射観測用超長基線 干渉計 (VLBI) システム

馬 鳥 直 哉\*・富 沢 一 郎\*\*  
芳 野 赴 夫\*\*\*

## Very Long Baseline Interferometry (VLBI) System for Observation of Jupiter's Decametric Emissions

Naoya BATORI, Ichiro TOMIZAWA, and Takeo Yoshino

### Abstract

*VLBI of the hundred-kilometer baseline provides the angular resolution of several arcseconds, and the sensitivity to the movement of a radio source and to the phase fluctuation introduced by the interplanetary density fluctuation, even at the frequency of the Jupiter's decametric emissions. An observation and analyzing system of VLBI is newly constructed with the restriction of the stability better than  $4 \times 10^{-9}$  on the standard frequency oscillators.*

*At the two stations separated hundreds of kilometers each other, the 24.255 MHz signal, the 20 kHz reference frequency, and the JJY time signal are simultaneously recorded on the same magnetic tape. Afterwards the data is digitized with the aid of 20 kHz and JJY. The interferometry process is performed by the software. The upper limit of the angular diameter is determined by the maximum cross-correlation coefficient  $C_{\max}$ , then both the movement of the source and the fluctuation of the phase are deduced from the fringe frequency deviation.*

*The presence of amplitude and phase fluctuation disturbs the measurement of  $C_{\max}$  and the fringe phase. It is estimated that the total error of  $C_{\max}$  in this VLBI system is  $\pm 14\%$  at the signal to noise ratio 10 dB.*

### 1. はじめに

木星デカメートル波放射は現在まで数多くの観測が行われ、その特徴についてかなり詳しく調べられてきたが放射機構については、いまだ明らかにされていない<sup>1)</sup>。この放射機構を明らかにする上から今で行わ

れている観測に加えて放射源の視直径と移動、および放射強度変動について定常的な観測が要請されている。

菅平宇宙電波観測所では 1977 年より 21.87 MHz において調布および豊川を含めた三地点において強度変動の同時観測を行っており、この結果から放射源の

\* 応用電子工学科電波物理学講座, 現在三菱電機勤務

\*\* 菅平宇宙電波観測所

\*\*\* 応用電子工学科電波物理学講座

視直径が 10 秒角以下であり、しかも地上で観測される強度変動には、木星と地球間の惑星間空間プラズマの乱れによる強度シンチレーションが木星放射源自体の強度変動に重畳しており、地上観測から木星自体の強度変動を求めるのは難しいことがわかった<sup>2)</sup>。

しかしながら、現用の観測システムでは、角度分解能が惑星間空間プラズマの乱れのスケールとフレネルフィルタの効果により、10 秒角程度となり、これ以上の向上は望めない。また、観測している波長が約 14 m であるため、1つのアンテナシステムにより、角度分解能を上げることは非常に困難である。したがって、角度分解能を上げる方法としては、観測アンテナを複数用意し、それらを波長に比べて十分遠方に離して設置し、それらの出力同士を干渉させることにより実質的に、角度分解能を上げる長基線干渉計システム以外にはない。干渉計による木星電波観測は、2つ以上の距離的に遠く離れた観測点において同時観測を行うための技術上の難しさがああり、現在まで観測例はあまり多くない<sup>3), 4), 5)</sup>。この干渉計システムでは角度分解能の良さに加え、干渉縞の時間的変化から、伝搬通路の変化が検出できるという利点があり、これを利用することにより、放射源の空間的な動きや放射源から観測点までの伝搬通路に存在するプラズマの乱れの分布を調べることができるので、効果的な方法であるといえる。筆者等は基線長を 1000 km 程度とした超長基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometer: VLBI) を構成すべく、2台の観測装置、記録装置、時計装置、および解析装置を製作し、全システムの性能について評価した。本装置は、現在実際の観測に入っている。本論文では VLBI システムの概要と性能評価の結果について述べる。

## 2. VLBI の木星デカメートル波観測への応用

### 2.1 角度分解能の向上

遠く離れた 2 地点で受信された電波を干渉させた場合に干渉縞が得られる。放射源がガウス型の輝度分布で、しかもインコヒーレントであると仮定すると放射源の視直径の上限は次式より、観測点間の距離を  $S_\lambda$  として、2 地点で観測された電波の干渉つまり相関をとったときの相関係数の最大値  $C_{\max}$  から決められる<sup>6)</sup>。

$$(2\phi_0)_{\max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{-\ln(C_{\max})/S_\lambda^2} \quad (1)$$

ただし  $(2\phi_0)_{\max}$ : 放射源の視直径 [rad]

表 1 いくつかの基線長に対する視直径の上限。  
ただし  $f=24.255$  MHz,  $C_{\max}=0.9$  とした

基線長	$S_\lambda$	$(2\phi_0)_{\max}$
100 km	8085	5.27 秒角
200 km	16170	2.64 秒角
500 km	40425	1.05 秒角
1000 km	80850	0.53 秒角

$C_{\max}$ : 干渉縞の最大係数値  
( $0 < C_{\max} < 1$ )

$S_\lambda$ : 波長で表わした観測点間の基線距離

ここで波長  $\lambda=12.37$  m ( $f=24.255$  MHz),  $C_{\max}=0.9$  の場合に、いくつかの基線長に対する視直径の上限を求めた結果を表 1 に示す。この表から惑星間空間強度シンチレーションの 10 秒角に比べて分解能が上げられることがわかる。またこれらの値は 40 秒角という木星の視直径に比べて十分小さいので放射源の視直径の上限についてかなり正確に求められる。また、干渉計においては個々の視直径が十分小さい放射源であっても同時に数個が広がって、しかも互いに何の関連性もなく存在するときは相関係数の最大値が小さくなるため視直径が大きいと見なされる。こうした理由により放射源の広がりについても情報が得られる。

### 2.2 放射源の空間的移動の検出

現在までの木星デカメートル波放射強度観測から、B-source の中や、B-source と A-source の境界において放射強度変動の時間スケールが急激に変化する場合のあることが報告されているが<sup>2)</sup>、こうした変化の原因は放射源の位置の移動にあるのではないかと考えられる<sup>7)</sup>。こうした移動は、伝搬路長の変化となるため干渉計で観測している場合には干渉縞の位相変化として現れる。ここで最も急激な放射源の空間的移動として、5 分間で木星の一方の極から他方の極までの角度にして 40 秒間の移動を考える。また、周波数は 24.255 MHz、基線長を 1000 km、基線の直角方向と電波の到来方向のなす角を  $0^\circ$  とする。このときの 5 分間の干渉縞の位相変化  $d\theta$  は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} d\theta &= 2\pi S_\lambda d\phi \\ &= 2\pi \times 80850 \times 1.94 \times 10^{-4} \\ &= 98.5 \text{ [rad]} \end{aligned} \quad (2)$$

これは 1 秒間に周波数が 0.1 Hz 変化することに相等している。この変化を検出するためには 2 地点の観測システム間の相対周波数差を受信周波数において

0.1 Hz 以下に抑えなければならない。これは言い換えれば 2 地点の基準周波数発振器の安定度が  $4 \times 10^{-9}$  以上なければならないことを示している。したがって、もっとゆるやかな移動を調べるためには更に安定な基準周波数源を用いなければならない。

### 2.3 惑星間空間シンチレーションの検出<sup>8)</sup>

2.2 では放射源の移動を検出できたと述べたが、放射源から地球上の観測点までの伝搬路の太陽風プラズマの密度的な乱れも 2 地点の相対位相を変化させている。この相対的な位相変化は直線的な変化ではなく雑音のようなランダムなものであるが、位相変化の 2 乗平均およびスペクトルから惑星間空間プラズマ中の乱れの様相が調べられるので重要な意義がある。

## 3. VLBI システムの概要

本 VLBI システムは、図 1 に示すように 2 台の特性のそろった受信機を基線の両端に設置し、24.255 MHz の受信信号を基準発振器に位相ロックされた局部発振器により 5 KHz に変換し、これを基準発振器から作った 20 KHz の正弦波および 2 地点の時刻同期のために JJY 信号と同一の磁気テープ上に記録する。こうした観測により得られた磁気テープを持ち寄って

再生し、磁気テープに記録されている 20 KHz および JJY 信号を用いてデジタルデータに変換し磁気ディスクに格納後計算機によりソフト的に干渉処理を行うことにより求められる。

### 3.1 VLBI システムの基本仕様

木星デカメートル波放射観測用の VLBI システムは、距離的に離れた地点で受信記録しなければならないことから各々が完全に独立し、しかも十分な安定度を有することが条件である。以下に個々の基本仕様を示す。

- (1) 位相安定度が放射源の空間的移動を検出するに足るものであること。2.2 で述べたように最低  $4 \times 10^{-9}$  の周波数安定度が必要である。
- (2) 受信機は、受信信号の帯域幅を 3 KHz に制限し、5 KHz に変換しなければならないので数回狭帯域フィルタを通すが、これらフィルタの位相特性は線型でしかも帯域内の相対位相差を  $5^\circ$  以下に抑えなければならない。
- (3) 最小検出可能フラックス密度を  $1 \times 10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>・Hz 以下とすること。
- (4) 受信周波数 (24.255 MHz) が木星電波に比べてはるかに強力な放送や通信などの混信を受

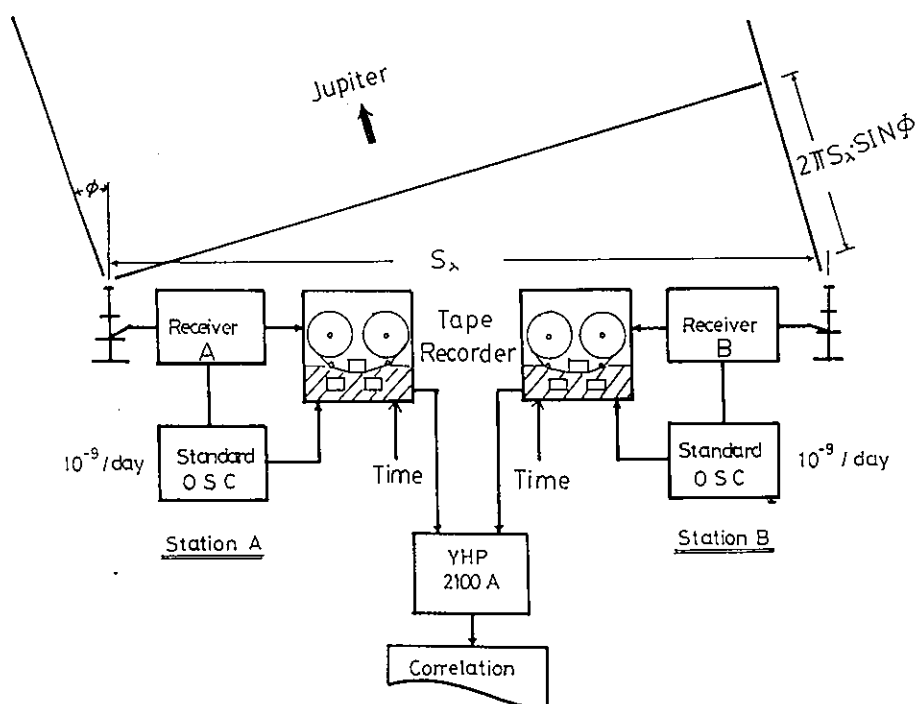


図 1 VLBI システムの概念図

けないよう十分な選択度とダイナミックレンジを有すること。

- (5) 2地点で受信された信号間の正確な同期を取るためには受信帯域幅 3 KHz の逆数、つまり  $300 \mu\text{sec}$  以内で時刻合せをしなければならないが、現段階においては、絶対遅れ時間を問題とせず相関係数の最大値を求めるだけなので数 msec の時刻合せができればよい。
- (6) 観測機器を遠方の観測点まで運搬しなければならないので、簡易でしかも衝撃等に対して堅牢であること。

### 3.2 基準周波数発振器系

本システムでは基準周波数発振器として、タケダ理研製 TR 3310 および Sulzer 社製 Model 5 A を使用している。2台共その安定度は  $2 \times 10^{-9}$  となっており  $4 \times 10^{-9}$  という条件をかるうじて満しているがまだ十分とは言えない。この安定度を監視するために  $10^{-12}$  の安定度を持つ 40 KHz の標準電波 JG 2 AS を利用している。

### 3.3 受信系

図2に受信系のブロックダイアグラムを示す。受信信号を 24.255 MHz から 5 KHz に変換し、しかも帯域幅を 3 KHz に制限した上2台の受信機間の位相特性を安定して一致させるためトリプルスーパーヘテロダイン方式を採用した。帯域制限のために用いたフィルタには帯域内位相変化が線型でしかも位相特性のそろった水晶フィルタを使用した。局部時振器は全て基準周波数発振器出力に位相ロックしているので  $2 \times 10^{-9}$

の安定度がある。この受信機では多段増幅を行っているため、特にダイナミックレンジを広くとることに注意して設計した。この中でも特に問題となる混合器にはショットキー・ダイオードを使用したダブルバランス・ミキサを採用し混変調を小さく抑えている。

### 3.4 時刻系

2地点の時刻信号として 2.5 MHz, 5 MHz, 8 MHz, 10 MHz の JJY 信号を用いた。これらの時刻精度は電離層の状態によって変化するため msec 程度しか得られないが現段階の時刻基準としては十分である。

### 3.5 記録再生系

両観測点において同様に受信信号出力 (5 KHz), 基準信号 (20 KHz), および時刻信号 (JJY) を磁気テープに記録する。テープレコーダには4トラック4チャンネルを用い記録速度を 38 cm/sec とし磁気テープのドロップアウトによる影響を極力抑えてある。

### 3.6 解析系

各観測点で記録されたデータを持ち寄り再生し、記録されている時刻信号により受信信号の A/D 変換を開始し、変換データを磁気ディスクに格納する。A/D 変換のクロックは観測時に受信信号と同一の磁気テープ上に記録された 20 KHz 基準信号を用いる。これにより記録再生系の走行速度不安定さを除去する。一回の A/D 変換で取り込めるデータ長は磁気ディスクの容量により制限され約 10 秒である。この操作を各観測点のデータについて行った後ソフト的に干渉処理を行う。

### 3.7 解析方法

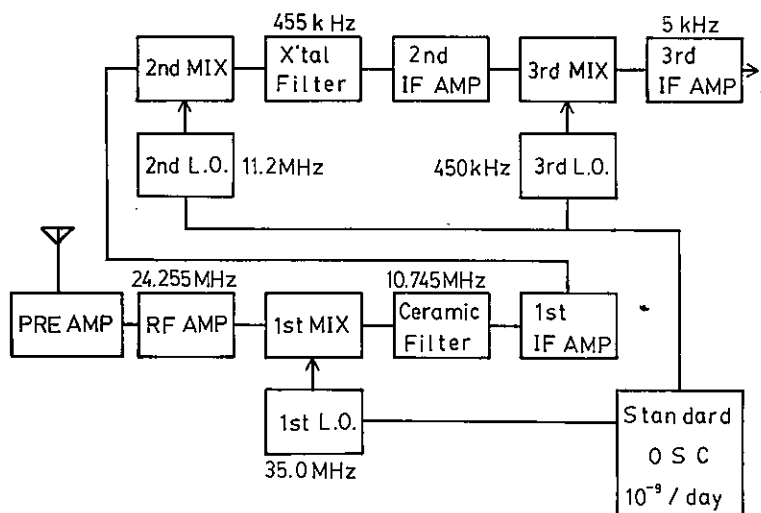


図2 受信系のブロックダイアグラム

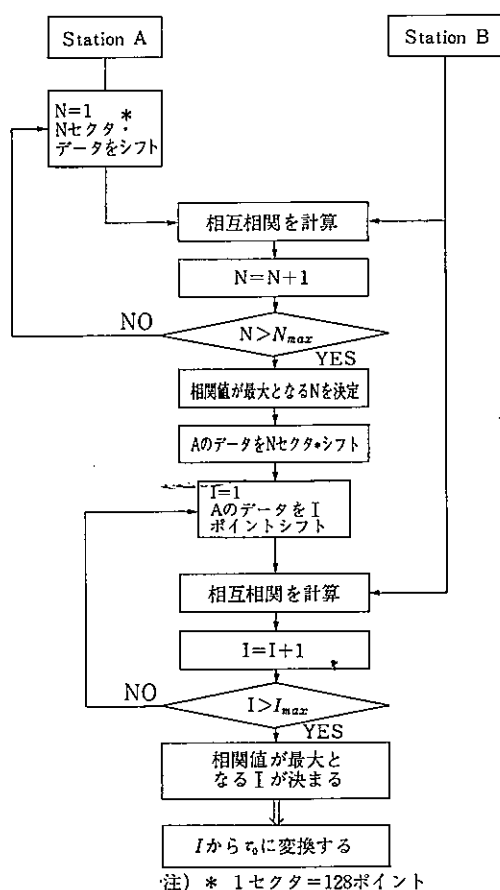


図3 2地点の観測データ間の時刻ずれを求めるフローチャート

磁気ディスクに取り込んだデータを図3のフローチャートに従って相互相関値が最大となる時刻ずれ  $\tau_0$  を決定する。この  $\tau_0$  は2地点間の時刻同期がずれていることと、A/D変換時に起こるタイミングのずれに起因するものであり、実際には数 msec となる。

この  $\tau_0$  を補正した後、図4の手順に従って干渉縞、干渉縞の周波数、干渉縞の位相の変動スペクトルを求める。

まず干渉縞を求める方法について述べる。2地点のデータの間の時刻ずれ  $\tau_0$  を補正した後データ長  $2N+1$  の間の相互相関係数を次式から求める。

$$C(t, \tau_0) = \frac{\sum_{k=-N}^N E_1(t_k) E_2(t_k + \tau_0)}{\left[ \sum_{i=-N}^N E_1^2(t_i) \cdot \sum_{j=-N}^N E_2^2(t_j + \tau_0) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

ただし、 $C$ ：相互相関係数

$E_1, E_2$ ：時刻  $t$  における観測点 1, 2 の受信信号電圧

$2N+1$ ：相関データ長

$t$  を順次変えながら (3) 式の値を計算することにより干渉縞を得ることができ、この中で最大となる相互相関係数  $C_{\max}$  を求めることにより (1) 式から放射源の視直径の上限  $(2\phi_0)_{\max}$  を求めることができる。

次に、上で求めた干渉縞の位相の時間的变化を周波数変化として調べるため干渉出力をベクトル解析する。ここで用いるスペクトル解析には、短いデータ長で高い周波数分解能の得られる最大エントロピー法 (MEM)<sup>9)</sup> を使用している。

解析系では 20 KHz の基準信号で 5 KHz の受信信号をサンプリングしているので実際のデータ間隔はほぼ  $\pi/2$  となってしまう  $\tau_0$  の推定値としては正確ではない。これが (3) 式の値に誤差となって現れ、 $C_{\max}$  の値を小さくする原因となっている。これを避けるため実際の処理においては、サンプリング定理<sup>10)</sup>によりサンプリングデータ間の任意点の値が求められるので、これを利用してデータ間隔を短くし  $\tau_0$  の値をより正しく求めることにより (3) 式の値の誤差を小さく抑えている。

#### 4. 誤差についての考察

2地点での受信出力電圧  $E_1, E_2$  は次式のように表わせる。

$$E_1(t) = (V_1 + V_{1n}) \sin(\omega t + \phi_1(t) + \phi_{1n})$$

$$E_2(t) = (V_2 + V_{2n}) \sin(\omega t + \phi_2(t) + \phi_{2n})$$

ただし、 $V_1, V_2$ ：信号成分の電圧

$V_{1n}, V_{2n}$ ：雑音成分の電圧

$\omega$ ：受信信号周波数

$\phi_1, \phi_2$ ：信号の位相角

$\phi_{1n}, \phi_{2n}$ ：位相雑音

この受信出力電圧  $E_1$  と  $E_2$  を掛け合せ低周波成分のみを取り出すと

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{V_1 \cdot V_2}{2} (1 + A_n) \cos(\phi(t) + \phi_n) \quad (4)$$

ただし、ここでは全ての雑音成分の変動が信号成分に比べて小さく、位相雑音の大きさが1ラジアンよりかなり小さいという微小変動条件をとっている。

$$\begin{cases} V_{1n} \ll V_1, V_{2n} \ll V_2 \\ \phi_{1n} \ll 1, \phi_{2n} \ll 1 \\ A_n = \frac{V_{1n}}{V_1} + \frac{V_{2n}}{V_2} \end{cases} \quad (5)$$

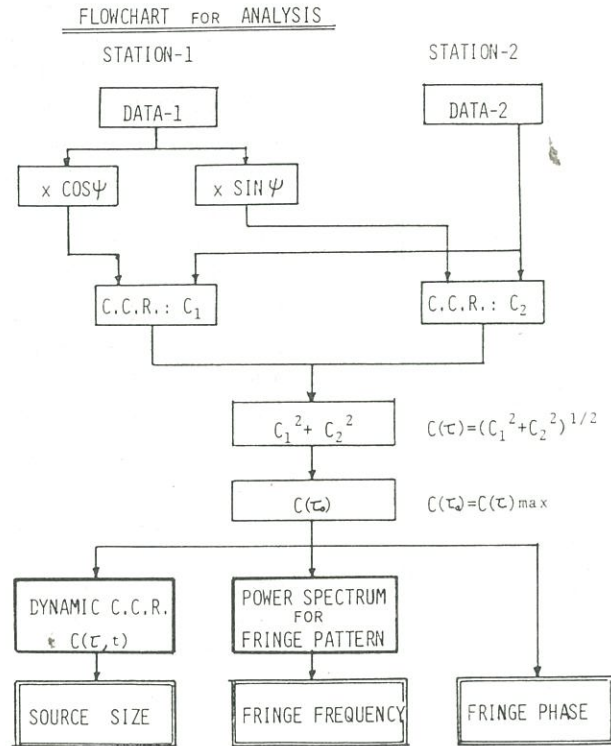


図 4

$$\begin{cases} \phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) \\ \phi_n = \phi_{1n} - \phi_{2n} \end{cases}$$

次に、2台の受信システムの振幅、位相変動の大きさが同じで、しかも  $V_{1n}$  と  $V_{2n}$ 、 $\phi_{1n}$  と  $\phi_{2n}$  が互いに独立であると仮定する。

$$\begin{aligned} \therefore \begin{cases} \sigma_A^2 = \frac{\langle V_{1n}^2 \rangle}{V_1^2} = \frac{\langle V_{2n}^2 \rangle}{V_2^2} \\ \sigma_\phi^2 = \langle \phi_{1n}^2 \rangle = \langle \phi_{2n}^2 \rangle \end{cases} \\ \therefore \begin{cases} \langle A_n^2 \rangle = 2\sigma_A^2 \\ \langle \phi_n^2 \rangle = 2\sigma_\phi^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

振幅、位相変動が存在するときの相互相関係数を  $C$ 、存在しないときの相互相関係数の最大値を  $C_{\max}$  とおくと(4)式から近似的に

$$C = C_{\max}(1 + A_n) \cos(\phi(t) + \phi_n) \quad (7)$$

となる。これを更に近似すると、

$$C = C_{\max}(\cos \phi(t) + A_n \cos \phi(t) - \phi_n \sin \phi(t)) \quad (8)$$

となり、振幅・位相変動が存在しないときの干渉縞の式  $C' = C_{\max} \cos \phi(t)$  に  $A_n \cos \phi(t) - \phi_n \sin \phi(t)$  という項が付け加わっている。相関係数が  $\phi(t) = 0$  において  $C_{\max}(1 + A_n)$  となり相関係数の最大値が  $A_n$  によって変わることがわかる。よって、 $C_{\max}$  を求める場合

に誤差となって現れるのは振幅変動成分であり、その大きさは(5)式より求められる。しかし、 $A_n$  自体はランダム変動と見なせるので多数回  $C_{\max}$  を求め平均をとることにより真の値に近いものを得られる。

実際に、振幅変動  $A_n$  および位相変動  $\phi_n$  を製作した VLBI システムにおいて求めてみる。

振幅、位相に影響を与える原因として、まず第一に上げられるのが受信信号の S/N である<sup>11)</sup>。図5に S/N に対する振幅変動率  $\sigma_A/A$  および位相変動  $\sigma_\phi$  [rad] の変化を示す。この図から S/N が1に近づくと  $\sigma_A/A$  が1に近づき、 $\sigma_\phi$  がやはり1ラジアンに近づくので当然(5)の微小変動条件を満足せず誤差が大きくなってしまふ。よって(5)を満足するような変動に抑えるためには S/N が10程度必要である。このとき

$$\sigma_A/A = 0.1, \quad \sigma_\phi = 0.1 \text{ [rad]}.$$

第二に、受信機自体の振幅、位相変動が上げられるが、実際にこのシステムの変動を測定した結果、一時間の測定において振幅変動は0.1以下でありほとんど無視できるが位相変動は局部発振器のジッタなどにより0.1 [rad]であった。

第三に、記録再生系の振幅・位相変動が上げられる。テープレコーダにはテープ走行速度の不安定に起因す

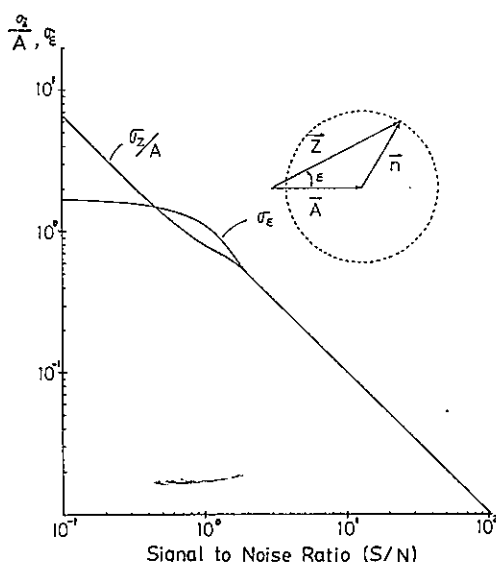


図5 S/N に対する振幅変動率  $\sigma_z/A$  および位相変動  $\sigma_\epsilon$  の変化.  $\sigma_\epsilon$  はラジアンで表わしている.

るワウとチャネル間のヘッドに対する位置変動に起因するスキューがありこれらが振幅位相変動の原因となっている. 実測した結果振幅変動が 0.055, 位相変動が 0.1 [rad] であった.

これらの変動は互いに独立であるので(6)より  $\langle A_n^2 \rangle$ ,  $\langle \phi_n^2 \rangle$  を求めることができる.

$$\begin{aligned}\langle A_n^2 \rangle &= 2[\langle A_n^2(S/N) \rangle \\ &\quad + \langle A_n^2(RX) \rangle + \langle A_n^2(MT) \rangle] \\ &= 2[0.1^2 + 0.01^2 + 0.055^2] \\ &= 0.14^2 \\ \langle \phi_n^2 \rangle &= 2[\langle \phi_n^2(S/N) \rangle \\ &\quad + \langle \phi_n^2(RX) \rangle + \langle \phi_n^2(MT) \rangle] \\ &= 2[0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2] \\ &= 0.24^2 \text{ [rad}^2\text{]}\end{aligned}$$

よって  $A_n$ ,  $\phi_n$  とほぼ(5)の条件を満たしているので(8)式から  $C_{\max}$  の値が  $\pm 14\%$  変化することを示している. この誤差の視直径の上限に対する影響は  $C_{\max}$  の値によって変化するが  $C_{\max}$  の小さい場合ほど大きく影響する.

一方, 干渉縞の位相変動が存在するため干渉縞のスペクトルが幅を持つようになり位相変化を精密に求める場合に問題となる. このスペクトル幅は(8)より  $A_n$  と  $\phi_n$  のスペクトルによって決まるもので, この値は実験的に求めなければならないが現段階ではまだ求めている.

表2 木星デカメートル波放射観測用 VLBI システムの特性

	Characteristics
Antenna	
Type	8-element Yagi x2
Gain	14 [dB]
Receiver	
Type	Triple Super Heterodyne
Frequency	24.255 [MHz]
Band Width	3.0 [kHz]
Total Gain	110 [dB]
Noise Figure	5.0 [dB]
Time Const.	0.1 [sec]
M. D. F. D.	$10^{-22}$ [w/m <sup>2</sup> Hz]
L. O.	
Type	PLL Synthesizer
Frequency Stability	$1 \times 10^{-9}$ [ /day]
Phase Jitter	less than 1 nsec
Reference Frequency	100 kHz and 10 kHz
Remarks	
Relative Phase Difference	$\pm 5$ [degree]

## 5. ま と め

木星デカメートル波放射観測用 VLBI システムの角度分解能および位相変化の検出について検討し, 必要なシステムの性能を求めた結果基線長を数 100 km とし, 観測点間の周波数安定度を  $4 \times 10^{-9}$  以上とすれば, 数秒角の分解能と, 5 分間に木星の視直径に相等する 40 秒を移動するという急激な変化の検出能力が得られるが, 詳しい観測には更に性能を向上が必要であることがわかった. こうした要求に基づき表2のような観測システムを製作し, 実際のシステムにおける誤差について振幅位相変動という点から考察した結果, 干渉縞の振幅変動率が 0.14, 位相変動が 0.24 [rad] となり変動が小さいと仮定した場合の近似式が使え, この式から干渉縞の相関係数の最大値  $C_{\max}$  に対する誤差が  $\pm 0.14$  となる. 一方, 干渉縞の位相変動は振幅変動率と位相変動のベクトル和となるため単純には求められない. この値については実験的に求める必要がある.

今後, このシステムを改良するとともに, 実際に木星電波の VLBI 観測を行う予定である.



## 謝 辞

VLBI 観測について議論と助言を頂いた高知高専  
今井一雅氏に感謝する。

本研究の一部は、科学研究費特定研究(1)「惑星間  
空間とプラズマ状態」によるものである。

## 参 考 文 献

- 1) Carr, T. D. and M. D. Desh: "Recent Decametric and Hectometric Observation of Jupiter, ed. by T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, pp. 693-737 (1976)
- 2) 今井一雅, 富沢一郎, 齊藤 誠: 「木星デカメートル波放射における L パーストの起源に関する観測研究」, 電気通信大学学報, **29**, pp. 5-12 (1978).
- 3) Slee, O. B. and C. S. Higgins: "The Apparent Size of the Jovian Decametric Radio Sources," Aust. J. Phys., **19**, pp. 167-180 (1966).
- 4) Stannard, K. M., G. A. Dulk, and B. Reyrher: "Very Long Baseline Interferometry of Decametric Radiation from Jupiter", Radio Sci., **5**, pp. 1271-1280 (1970).
- 5) Carr, T. D., M. A. Lynch, M. P. Paul, G. W. Brown, J. May, N. F. Six, V. M. Robinson, and W. F. Block: "Very Long Baseline Interferometry of Jupiter at 18 MHz", Radio Sci., **5**, pp. 1223-1226 (1970)
- 6) Lynch, M. A., T. D. Carr, and J. May: "VLBI Measurements of Jovian S Bursts", Astrophys. J., **207**, pp. 325-328 (1976)
- 7) 今井一雅: 「木星デカメートル波における L パーストの起源に関する観測研究」, 電気通信大学応用電子工学科修士論文.
- 8) Cronyn, W. M.: "Interferometer Visibility Scintillation", Astrophys. J., **174**, pp. 181-200 (1972).
- 9) 日野幹雄: 「スペクトル解析」, 朝倉書店, pp. 83-91 (1977)
- 10) Bendat, J. S. and A. G. Piersol, 得丸英勝訳: 「ランダムデータの統計的处理」, 培風館 pp. 90-94 (1976)
- 11) Rogers, A. E. E.: "Very Long Baseline Interferometry with Large Effective Bandwidth for Phase-delay Measurements", Radio Sci., **5**, pp. 1239-1247 (1970)